

Approved For Release STAT  
2009/08/31 :  
CIA-RDP88-00904R000100130

Dec

Approved For Release  
2009/08/31 :  
CIA-RDP88-00904R000100130

25 YEAR RE-REVIEW



Вторая Международная конференция  
Организации Объединенных Наций  
по применению атомной энергии  
в мирных целях

A/CONF/15/P/2304  
USSR  
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит оглашению до официального сообщения на Конференции

*THE INFLUENCE OF ELECTRIC FIELDS IN ION BEAMS ON  
THE SEPARATION OF STABLE ISOTOPES BY THE ELECTRO-  
MAGNETIC METHOD*

"ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ИОННЫХ ПУЧКАХ  
НА РАЗДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ  
МЕТОДОМ".

М.В.Неалин, П.М.Морозов

Введение.

Опыт разделения изотопов электромагнитным методом показал, что при увеличении силы тока в ионном пучке выше некоторого предела происходит резкое нарушение компенсации объемного заряда пучка, которая осуществляется электронами, образующимися при взаимодействии быстрых ионов пучка с молекулами остаточного газа. Вследствие этого оказывалось возможным использовать для разделения изотопов не всю ту силу тока в ионном пучке, которую давал ионный источник, а в два-три раза меньшую.

Из этого опыта вытекала необходимость детального исследования процесса компенсации объемного заряда интенсивного ионного пучка, что и явилось целью настоящей работы.

Для проведения этого исследования было желательно иметь такое рабочее вещество, из которого в разряде ионного источника образовывались бы ионы одного массового состава. Поэтому наиболее удобным в методическом отношении рабочим веществом оказался металлический литий, поскольку при этом в ионном пучке отсутствовали не только ионы других элементов, но также и многозарядные ионы - вследствие высокого значения второго потенциала ионизации атома лития.

После окончания опытов с пучком ионов лития мы применили разработанную экспериментальную методику к изучению компенсации объемного заряда пучков ионов других элементов.

### Методика эксперимента

Наши опыты проводились на электромагнитном сепараторе с отклонением ионного пучка на  $180^\circ$ . Ионы лития, образованные в газозарядном ионном источнике (1), имели энергию 30 кэв и проходили по круговым траекториям в однородном поперечном магнитном поле  $H=2000$  эрстед. При работе с другими элементами (Ca, Cd, Zn, Te, Sn) применялось неоднородное безабберационное магнитное поле (при угле раствора пучка не выше  $30^\circ$ ). Радиус траектории ионов, имевших энергии (30-40) кэв, составлял 90 см.

Критерием степени компенсации объемного заряда ионного пучка в нашей работе являлась напряженность электрического поля в пучке, которую мы находили из распределения потенциала.

Измерение распределения потенциала в ионном пучке производилось путем измерения тех энергий, которые приобретают в электрическом поле пучка медленные вторичные положительные ионы, образующиеся при взаимодействии быстрых ионов пучка с молекулами остаточного газа. Измерение энергий вторичных положительных ионов производилось методом задерживающего поля.

Экспериментальная установка для исследования пучка ионов лития (рис.1) состояла из трех частей, располагавшихся под ионным пучком в начале, середине и конце его траектории. Первая установка (ближайшая к ионному источнику) включала в себя 7 одинаковых ячеек, состоявших из коллектора и двух диафрагм, в которых имелись щели шириной 1 мм и длиной 20-25 мм, ориентированные по ходу пучка. Коллекторы имели ширину 14 мм и длину 40 мм. Расстояние между диафрагмами было равно 15 мм, между второй диафрагмой и коллектором - 10 мм, между ячейками (считая от внешней стороны пучка), соответственно 15, 20, 25, 25, 25, 20 мм. Эти ячейки имеют номера от 14' до 17'. Остальные две установки отличались от первой только длиной щелей в ячейках и их взаимным расположением. Ячейки этих установок будут нумероваться, соответственно, двумя и тремя штрихами.

Последовательность измерения потенциала ионного пучка в районе каждой ячейки состояла в следующем. Прежде всего, чтобы из общего тока вторичных частиц, приходявших на коллектор, выделить ионную компоненту, на вторую диафрагму подавался отрицательный

(относительно стенок раздельной камеры) потенциал порядка нескольких десятков вольт (рис.2). После этого снималась зависимость ионного тока насыщения (при  $\sqrt{2} = -(75+100)$  вольт) от потенциала коллектора, которая имела такой вид, как на рис.3.

При интерпретации этой зависимости мы будем исходить из следующих предположений: 1) начальные энергии подавляющего большинства вторичных ионов (не превышавшие нескольких электронвольт) пренебрежимо малы по сравнению с потенциалом ионного пучка; 2) время пролета вторичного иона от места его образования в пучке до коллектора мало по сравнению с периодом колебаний потенциала пучка. Как будет видно из дальнейшего, в условиях наших опытов оба эти предположения хорошо выполнялись.

При этом величины  $\varphi_{min}$  и  $\varphi_{max}$  на рис.3 можно интерпретировать, соответственно, как минимальный во времени потенциал ионного пучка на границе с окружающей его вторичной плазмой, образованной выпадающими из пучка вторичными частицами, и максимальный во времени потенциал ионного пучка при данных  $x$  и  $y$ .

Зная распределение величин  $\varphi_{min}$  и  $\varphi_{max}$  по ширине ионного пучка, можно найти максимальные значения вертикальной и горизонтальной компонент напряженности электрического поля в пучке. Например, для первой установки:

$$E_x = \frac{d\varphi_{max}}{dx}; \quad E_z = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{h/2}$$

где  $x, z$  - поперечная и продольная координаты,  
 $h$  - высота ионного пучка, составлявшая 10 см  
 (кроме оговоренных ниже случаев).

Одновременно с измерением распределения потенциала производились наблюдения за распределением плотности ионного тока в пучке. Характеристикой этого распределения служило распределение плотности тока вторичных положительных ионов, измерявшееся при помощи семи зондов диаметром 4 мм, которые располагались над ионным пучком напротив ячеек первой установки (рис.4). Эти же зонды служили для измерения потенциала вторичной плазмы на ее границах с крышками раздельной камеры.

-4-

На рис.4 и 5 представлено распределение потенциала в пучке ионов лития, измеренное в условиях хорошей (рис.4) и плохой (рис.5) компенсации ионного пучка. Из рис.4 и 5 видно, что, в зависимости от условий работы разделительной установки, величина электрических полей в пучке (как вертикальных, так и горизонтальных) может изменяться в пределах от (1-2) в/см до 10 в/см и выше.

Данные, представленные на рис.4 и 5, относятся к началу траектории ионного пучка. Совершенно аналогично как в качественном, так и в количественном отношении выглядит распределение потенциала на середине и в конце траектории пучка.

В дальнейшем мы под потенциалом ионного пучка будем иметь в виду его значение ( $\varphi_{max}$ ) в той точке поперечного сечения пучка, в которой плотность тока имеет максимум.

#### Основные причины декомпенсации объемного заряда ионного пучка

Очевидно, что если на ионный пучок не действуют внешние электрические поля, то единственной причиной сильной декомпенсации его объемного заряда являются колебания концентрации положительных ионов пучка во времени.

В реальных условиях работы разделительной установки единственным внешним электрическим полем, которое могло бы уводить электроны из ионного пучка, является поле положительной головки ионного источника (1). Для устранения провисания этого поля в квазикомпенсированную область пучка в оптику источника вводится промежуточный электрод (1), имеющий отрицательный (относительно стенок разделительной камеры) потенциал порядка (10-20) кв. Роль этого электрода иллюстрируется рис.6, который показывает, что при уменьшении отрицательного потенциала промежуточного электрода ( $\sqrt{n \cdot \varepsilon}$ ) ниже некоторого критического значения ( $\sqrt{k p}$ ) электрические поля в ионном пучке резко возрастают и достигают 75 в/см.

Все дальнейшие опыты проводились при  $|\sqrt{n \cdot \varepsilon}| > |\sqrt{k p}|$ . Эти опыты показали, что одной из главных причин, приводящих к сильной декомпенсации объемного заряда пучка ионов лития, являются колебания в разряде ионного источника, имеющие частоты порядка нескольких десятков кгц. Это следует, в частности, из рис.7, который показывает, что если каким-либо образом, например, изменением тока

-5-

разряда, увеличивать амплитуду разрядных колебаний, то это вызывает резкое возрастание электрических полей в ионном пучке от  $1-2$  в/см до  $50$  в/см.

Что касается механизма колебаний в разряде, то П.М.Морозовым и А.В.Жариновым было показано, что он связан, по крайней мере - частично, с наличием у катода минимума потенциала, обусловленного объемным зарядом электронов.

Чтобы ликвидировать минимум потенциала у катода мы применили метод увеличения ионного тока на катод, которое осуществлялось путем увеличения давления паров лития в прикатодной части разрядной коробки ионного источника. Индикатором давления паров лития в разряде являлась сила тока в ионном пучке (при постоянных токе и напряжении разряда), приходящаяся на  $1 \text{ см}^2$  площади рабочей щели в разрядной коробке.

Результат применения этого метода оказался очень резко зависящим от геометрии разрядной коробки, а именно - от того, как близко ее рабочая щель подходила к катоду, а также - от площади этой щели. Опыты были проведены с четырьмя разрядными коробками, которые мы будем различать индексами 1, 2, 3, 4. В случае 1 рабочая щель разрядной камеры почти вплотную примыкала к катоду (размеры щели  $180 \text{ мм} \times 4 \text{ мм}$ ); в случае 2 щель, при тех же ее размерах, начиналась на  $40 \text{ мм}$  ниже; в случае 3 щель также была отодвинута на  $40 \text{ мм}$  вниз и имела размеры  $100 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$ ; случай 4 отличается от 1 только меньшей шириной рабочей щели ( $3 \text{ мм}$ ). Очевидно, что при одинаковом среднем давлении паров в разрядной коробке и одинаковых токе и напряжении разряда ионный ток на катод в случае "1" был наименьшим - как вследствие частичного ухода ионов из прикатодной области в рабочую щель, так и вследствие меньшего давления паров в этой области.

На рис. 8 показана зависимость потенциала ионного пучка от давления паров лития в разрядной коробке для этих четырех случаев. Рис. 8 показывает, что в то время, как в случае 1 потенциал пучка при большой силе тока остается все время очень высоким - порядка  $(250-180)$  в (при этом электрические поля в пучке, достигают  $75 \text{ в/см}$ ), в случаях 2 и 3 увеличением давления паров выше некоторого предела удается за счет значительного уменьшения амплитуды разрядных колебаний - снизить потенциал пучка до  $50 \text{ в}$ . При этом электрические поля в пучке уменьшаются до  $5-7 \text{ в/см}$  (т.е. более, чем на порядок величины), и фокусировка пучка резко улучшается.



-6-

Этот пример показывает, что методика измерения распределения потенциала в ионном пучке позволяет быстро и однозначно выбрать оптимальную геометрию разрядной коробки ионного источника (которая, как видно из рис. 8, соответствует случаю 2), а также оптимальные параметры разряда.

После окончания работы с пучком ионов лития методика измерения электрических полей в пучке была применена нами для нахождения оптимальных условий разделения изотопов ряда других элементов (кальция, кадмия, цинка, теллура и олова). Для измерения распределения потенциала в пучках ионов этих элементов применялась установка из 19 измерительных ячеек, располагавшаяся под ионным пучком на середине его траектории. Ячейки этой установки отличались от описанных выше только длиной щелей (50 мм) и размерами коллекторов (100 мм x 20 мм). Расстояние между ячейками составляло 3 см. Одновременно с измерением распределения потенциала проводилось наблюдение за фокусировкой ионных пучков (угол раствора пучков не превышал  $30^\circ$ ). Это позволило для каждого разделяемого элемента установить ту, предельную-допустимую напряженность электрического поля ( $E$ , соответственно, потенциала пучка -  $\varphi_{дон}$ ), при которой еще достигается необходимая степень разделения изотопов (см. табл. 3.1).

Таблица 1

Элемент	Ca	Zn	Cd	Te	Sn
$\varphi_{дон}$ (вольт)	50	30	25	25	25

Опыты показали, что для всех исследованных элементов наблюдается одна и та же закономерность: при увеличении силы тока в ионном пучке - независимо от того, регулировкой какого параметра разряда оно осуществляется, - степень декомпенсации объемного заряда ионного пучка резко возрастает. Это иллюстрируется рис. 9 (кривая 1) который показывает, что наибольшая допустимая сила тока в пучке, при которой еще выполняется условие  $\varphi \leq \varphi_{дон}$ , более чем в два раза, меньше силы тока, которую обеспечивает

-7-

ионный источник<sup>I)</sup>. Отсюда следует, что декомпенсация ионного пучка резко ограничивает производительность разделительной установки.

С целью улучшения компенсации пучков ионов этих элементов мы, прежде всего, применили описанный выше метод увеличения ионного тока на катод. Результат опыта для случая пучка ионов кальция представлен на рис.9 (кривая 2), который показывает, что примененный метод позволяет осуществить хорошую компенсацию ионного пучка (и, следовательно, хорошую его фокусировку) при вдвое большей силе тока в ионном пучке. Иными словами, это позволяет удвоить производительность разделительной установки.

Необходимо отметить, что успешное применение этого метода отнюдь не означает, что сильная декомпенсация объемного заряда ионного пучка вызывается только колебаниями в разряде ионного источника.

Дальнейшие исследования, проведенные нами на элементах таблицы 1 с применением методики измерения распределения потенциала в ионных пучках, позволили установить и другие причины нарушения компенсации ионных пучков. В процессе этих исследований были найдены и другие методы радикального улучшения компенсации пучков ионов любых элементов, позволившие снять резкое ограничение производительности разделительной установки, вызывавшееся ранее декомпенсацией ионных пучков, и осуществить эффективное разделение изотопов различных элементов при той максимальной силе тока в ионном пучке, которую только позволяет получить ионный источник. Применение этих методов (наряду с описанным выше методом увеличения ионного тока на катод) позволило, в частности, при разделении изотопов кальция, цинка, кадмия удвоить производительность разделительной установки и является безусловно необходимым для правильного ведения процесса разделения изотопов других элементов.

Подробное изложение этих вопросов будет опубликовано отдельно, поскольку это выходит за рамки настоящего доклада, целью которого было на ряде примеров продемонстрировать влияние электрических полей в ионных пучках на разделительный процесс и показать эффективность применения методики измерения этих полей к установлению оптимальных параметров работы электромагнитной установки при разделении изотопов различных элементов.

I) На рис.9 приведены значения полной силы тока  $I$ , извлекавшейся из ионного источника. Сила тока в пучке однозарядных ионов  $\text{Ca}^+$  равнялась примерно половине величины  $I$ .



-8-

Л и т е р а т у р а

1. Морозов И.М., Маков Б.Н. Иоффе М.С., Брожнев Б.Г., Фрадкин Г.М.  
"Ионный источник для разделения стабильных изотопов", 1958

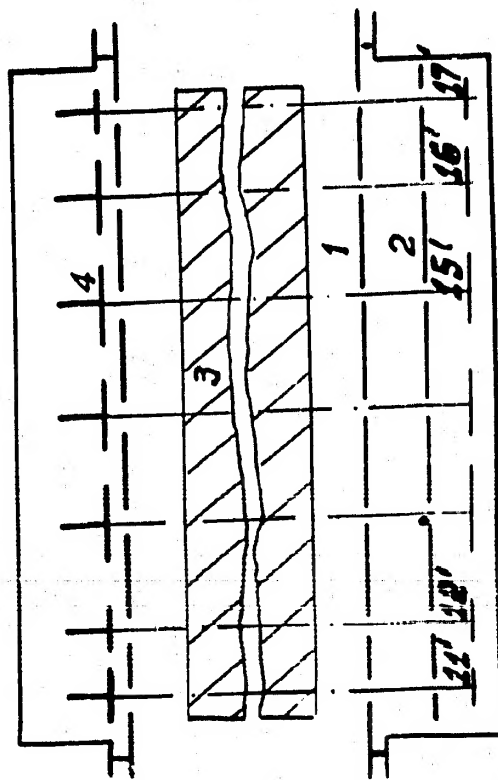


Рис.1. Экспериментальная установка. 1 и 2 - первая и вторая диафрагмы, 11 - 17 - коллекторы, 3 - поперечное сечение ионного пучка, 4 - зонд

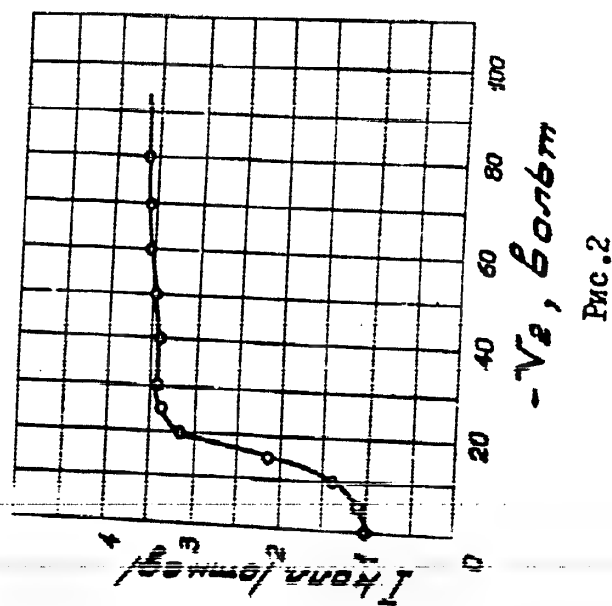


Рис. 2

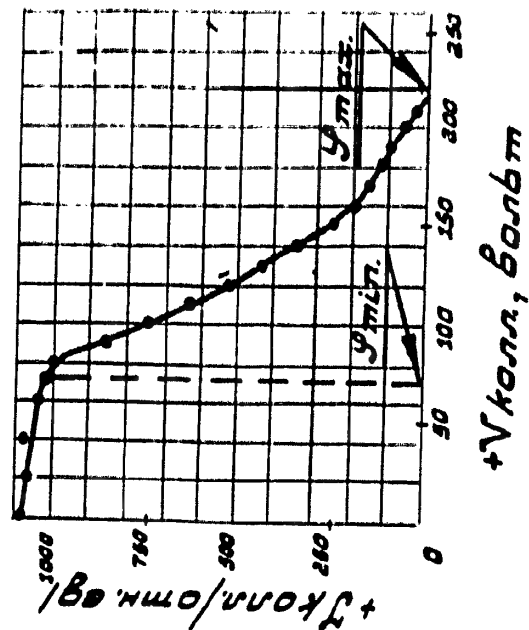
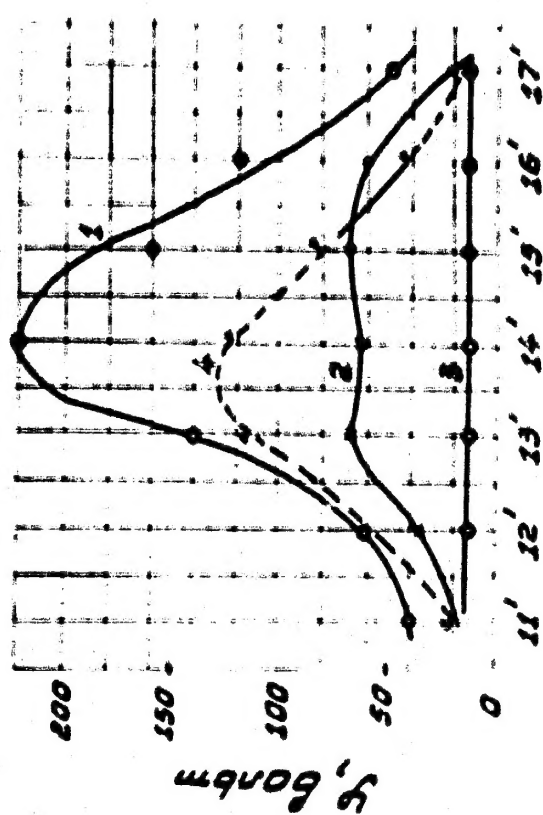


Рис. 3



Номер коллектора

Рис. 4. Потенциал пучка (1-максимальный, 2-минимальный) и плотность тока вторичных ионов (3)



Номер коллектора

Рис. 5. Потенциал пучка (1-максимальный, 2-минимальный), плотность вторичной плазмы (3) и плотность тока вторичных ионов

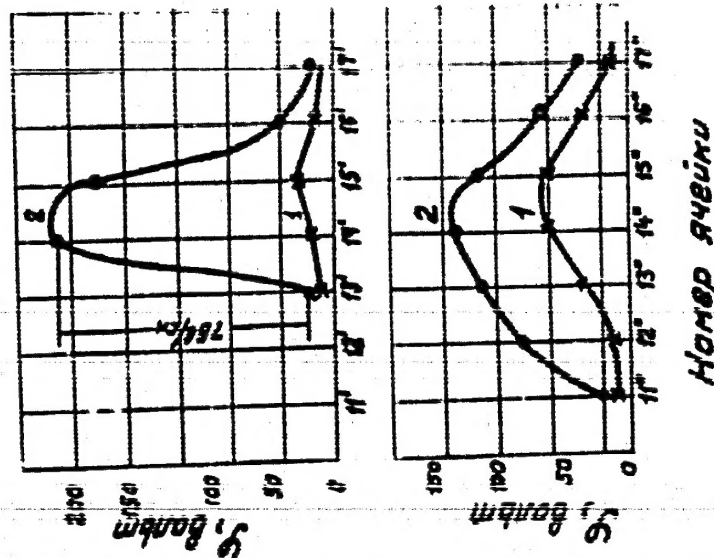


Рис.6. Распределение потенциала по ширине пучка;  
 $1 - \sqrt{n \cdot \varepsilon} \geq 4 \text{ кВ};$   
 $2 - \sqrt{n \cdot \varepsilon} = 2,5 \text{ кВ}$

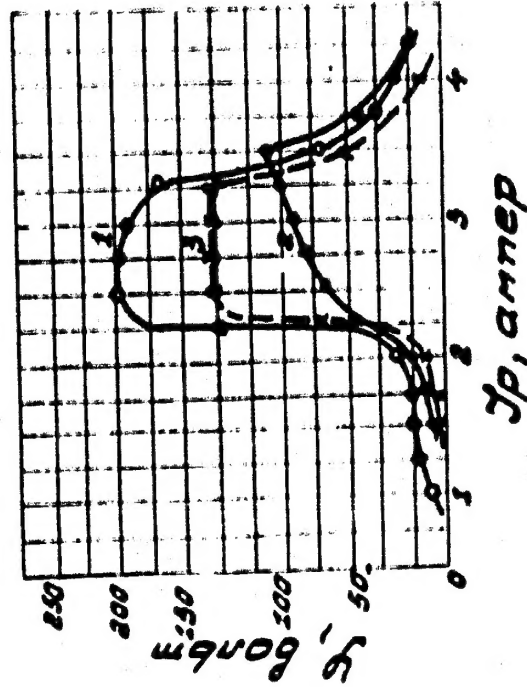


Рис.7. Влияние тока разряда на потенциал пучка в точках 14 и 15; 3-амплитуда колебаний тока разряда

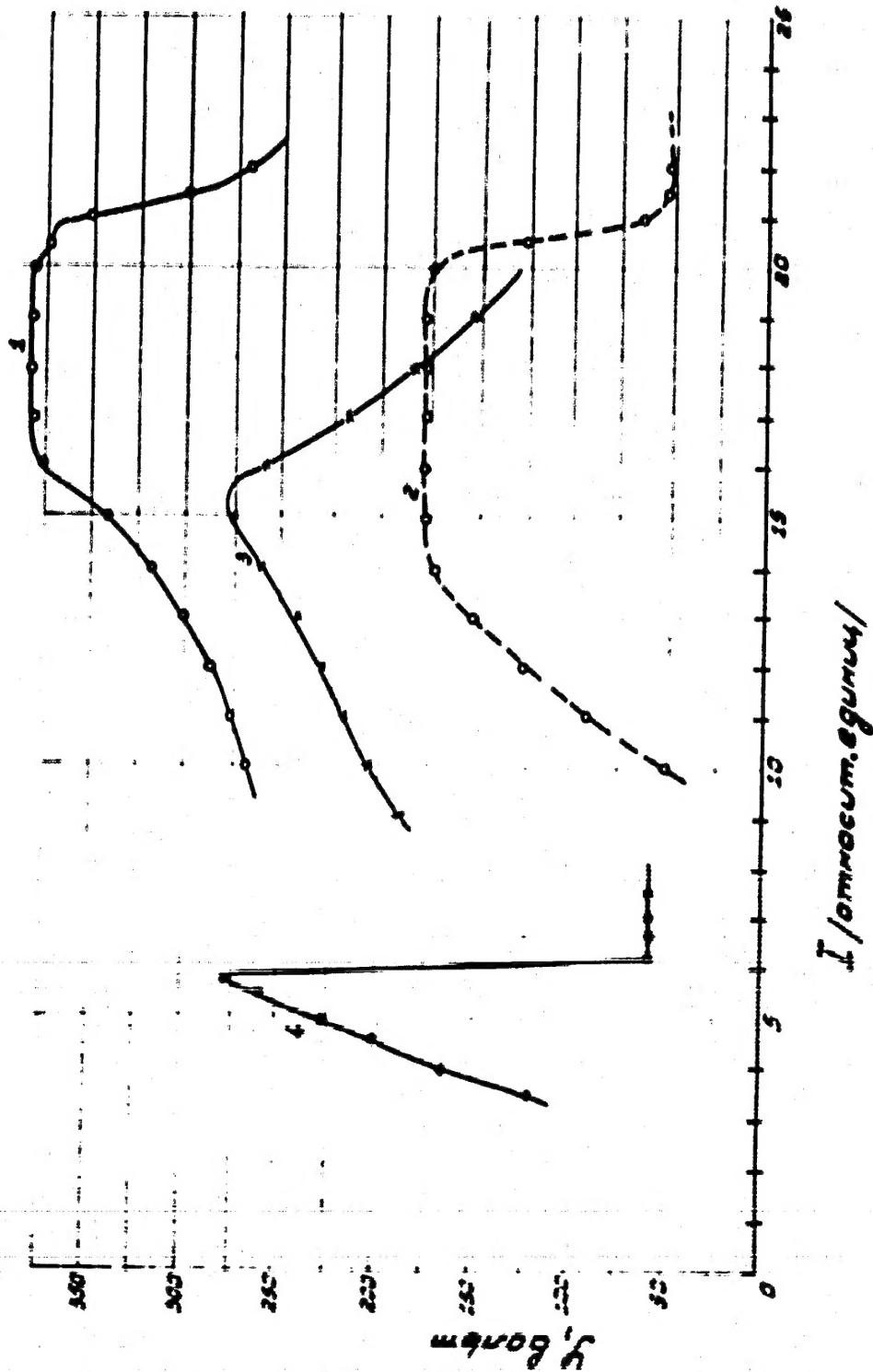


Рис.8. Зависимость потенциала ионного пучка от силы тока в пучке



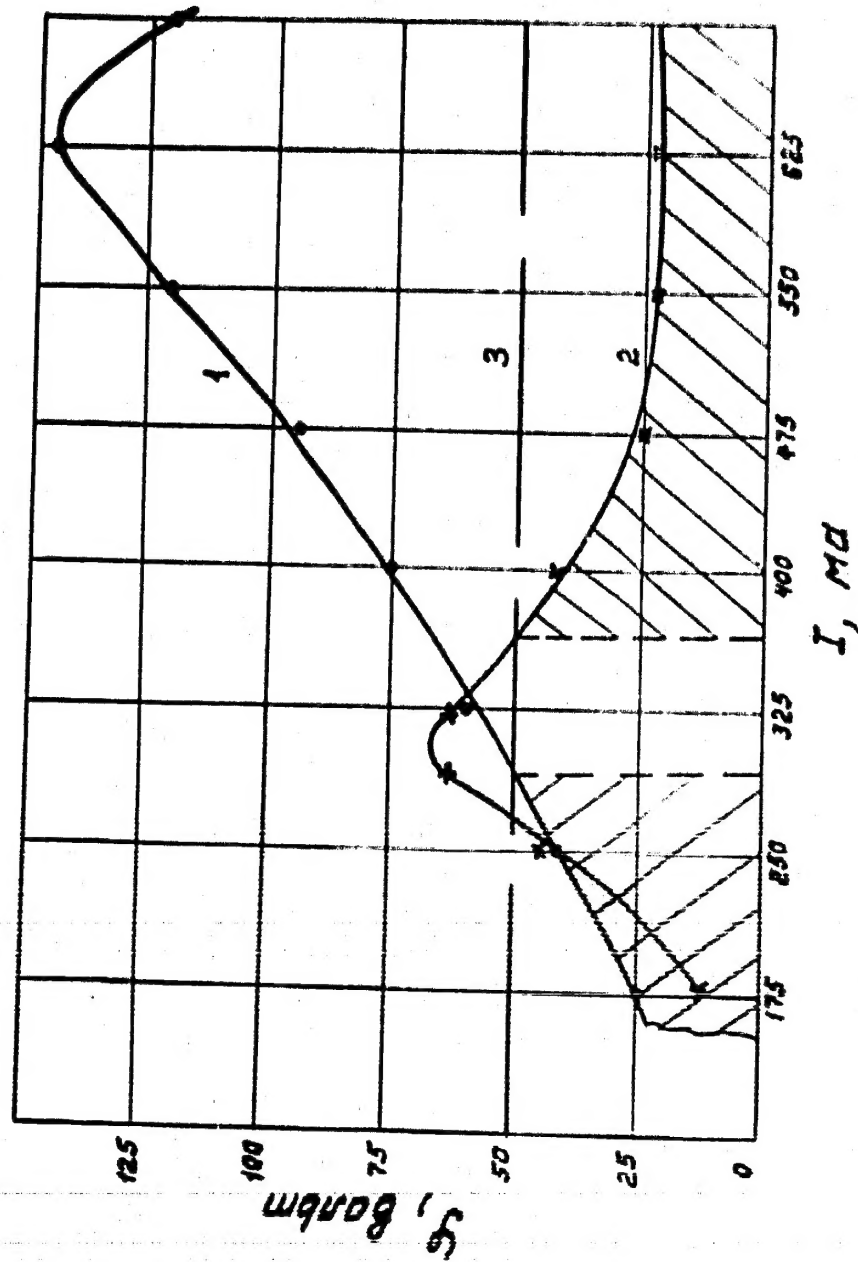


Рис. 9. Зависимость потенциала пучка ионов кальция от силы тока в пучке. 3-допустимый потенциал пучка